

補助事業番号 2021M-132
 補助事業名 2021年度ひずみ速度依存性と異方性を活用した高機能プロテクターの開発補助事業
 補助事業者名 金沢大学 理工研究域 フロンティア工学系 ロボティクス・デザイン研究室
 樋口 理宏

1 研究の概要

本研究では、汎用的な軟質エポキシ樹脂を母材としたひずみ速度依存性と異方性を活用した低速変形で柔軟であるが、衝撃負荷時のみ硬化する革新的なハニカム構造を創製し、スポーツおよび日常生活で気軽に着用できる高機能プロテクターを開発することを目的とする。そのため、熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂を任意のハニカム構造に成形する方法を検討し、同ハニカム構造のプロテクターとしての性能を評価する。

2 研究の目的と背景

スポーツ競技では、ボールやヒト同士の衝突による競技者の受傷を軽減するために硬質な樹脂や複合強化樹脂により構成されるプロテクターが利用されている。また、児童・幼児用の自転車ヘルメットや、高齢者用のヒッププロテクターなど、日常生活における不慮の事故に備えるための保護具が普及してきている。しかし、硬質な保護具は、衝撃低減効果は高いが、頭部などに装着箇所が限定され、また常に使用し続けるのには難がある。逆に、スポンジのような軟質な保護具は装着性に優れる反面、衝撃低減効果が低い。

本研究では、汎用的な軟質エポキシ樹脂を母材としたひずみ速度依存性と異方性を活用した低速変形で柔軟であるが、衝撃負荷時のみ硬化する革新的なハニカム構造を創製し、スポーツおよび日常生活で気軽に着用できる高機能プロテクターを開発することを目的とする。

3 研究内容

<http://da.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/rdlab/wp-content/uploads/2022/05/jka2021-M132.pdf>

ハニカム構造の変形特性を特徴付ける等価弾性係数、曲げ剛性およびねじり剛性を理論解析により導いた。ハニカムの基本周期は図1に示すセルからなる。面内および面外方向の一軸変形の理論解析は、はりの曲げ理論をセル壁の変形に適用することによって導出される。また、曲げおよびねじり変形はChenの理論に基づき、反転ハニカムに適用可能な曲げおよびねじり剛性を次式のように導出した。

$$D_x = E_s I_s \times \gamma \times \left(\frac{\sin \theta}{\alpha - \cos \theta} \right) \times \left[\frac{(2\alpha\delta + \cos^2 \theta) + \sin^2 \theta (q_z \times \beta\gamma^{-2})}{2\alpha\delta \sin^2 \theta + (1 + 2\alpha\delta \cos^2 \theta)(q_z \times \beta\gamma^{-2})} \right], \quad D_y = E_s I_s \times \gamma \times \left(\frac{\alpha - \cos \theta}{\sin \theta} \right) \times \left[\frac{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta (q_z \times \beta\gamma^{-2})}{2\alpha\delta \sin^2 \theta + (1 + 2\alpha\delta \cos^2 \theta)(q_z \times \beta\gamma^{-2})} \right]$$

$$D_1 = E_s I_s \times \gamma \times (\sin \theta \cos \theta) \times \left[\frac{1 - (q_z \times \beta\gamma^{-2})}{2\alpha\delta \sin^2 \theta + (1 + 2\alpha\delta \cos^2 \theta)(q_z \times \beta\gamma^{-2})} \right], \quad D_{\theta} = E_s I_b \times \gamma^3 \times \left[\frac{\sin \theta (\alpha - \cos \theta)}{\gamma^2 (1 - \alpha \cos \theta)^2 + [2q_{xz} \delta^3 + q_{xz}] \alpha^2 \beta \sin^2 \theta} \right]$$

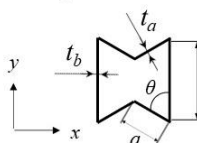


図1 セル形状

次に、エポキシを母材としたハニカム成形方法を検討した。エポキシ樹脂は主剤と硬化剤からなる2液混合型熱硬化性樹脂であり、接着性が高い。そこで、融点約50°Cのパラフィンワックスにより型を作製し、エポキシ樹脂の硬化後に型を融解させることで成形を行う。

成形の流れを図2に示す。(1)3Dプリンター(3Dsystems, Projet MJP2500 Plus)により型を原型を作製する。(2)作製した原型をシリコンへ転写させる。(3)作製したシリコン型に融解させたパラフィンワックスを注型し、型を作製する。(4)作製したパラフィンワックス型にエポキシ樹脂を注型し、常温で48時間かけ硬化させる。(5)エポキシの硬化後に型を融解し、成形が完了する。

前述の理論解析により、 $\theta=120^\circ$ の時、面内等方性となるハニカムであり、 $\theta=60^\circ$ の時、面内等方性かつ負のポアソン比となる反転ハニカムとなる。そこで、図3に示す、 $\theta=60^\circ$ 、 $a=7.5$ mm、 $b=15$ mm、 $h=7.5$ mm、 $t_a=t_b=1$ mmとした反転ハニカム構造、および同じセル面積となる1辺の長さ $a=b=7.5$ [mm]としたハニカム構造の2パターンを作製した。成形したハニカムおよび反転ハニカムは、理論解析で予想される変形挙動を示し、通常時は柔軟な構造とすることに成功した。

さらに、図4に示す衝突試験機により軟質エポキシハニカムの頭部保護具としての性能を評価した。飛翔体衝突試験では、野球の硬式球を飛翔体発射装置により発射し、エポキシハニカムを設置した頭部ダミーに衝突させた。衝突時においては、母材エポキシ樹脂のひずみ速度依存性により高いエネルギー吸収特性が発現され、同エポキシハニカム・反転ハニカムを装着することで、被衝突体に生じる加速度を低減することに成功した。

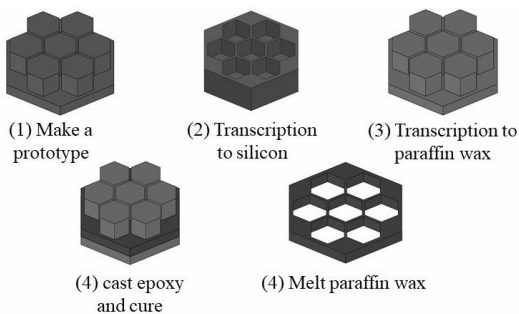


図2 ハニカム成形の流れ

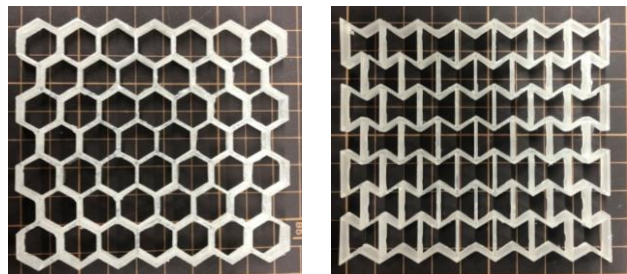


図3 成形したハニカム

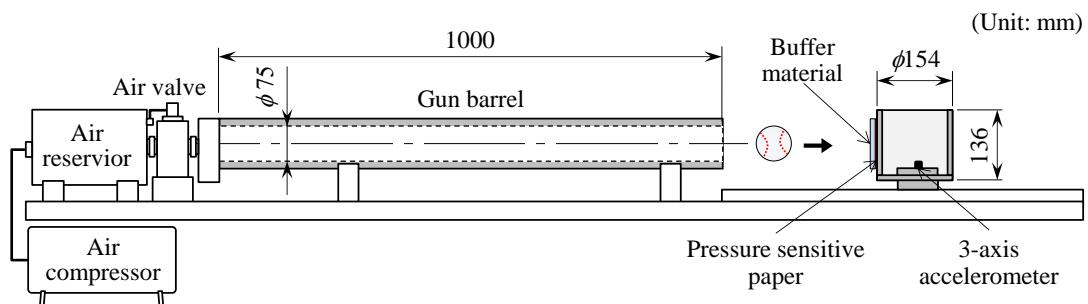


図4 衝突試験

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究で開発した低速変形では面外・面内ともに柔軟であり、衝撃負荷時のみ面外方向に硬化する柔軟ハニカムは、これまでにない機能を発現する構造材料であり、装着性の良いスポーツ用プロテクターや日常生活で着用可能な保護具だけでなく、その応用範囲は無限に広がっている。また、同柔軟ハニカムは母材が熱硬化性エポキシ樹脂であるため、産業界での普及にも期待される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

材料力学・材料強度に関連した教育・研究活動を行ってきており、エポキシ樹脂のひずみ速度依存性に関する研究を行ってきたが、今回の研究では、ハニカム構造の面内・面外異方性に着目し、ひずみ速度依存性と異方性を活用したこれまでにない機能を発現する構造を実現した。今後は、本事業で得られた基礎的な成果をさらに発展させ、様々な目的に応じた高機能プロテクターへの展開に取り組む。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

該当なし

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

事業の研究成果

(<http://da.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/rdlab/wp-content/uploads/2022/05/jka2021-M132.pdf>)

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 金沢大学理工研究域フロンティア工学系

(カナザワダイガク リコウケンキュウイキ フロンティアコウガクケイ)

住 所： 〒920-1192

石川県金沢市角間町

担 当 者： 准教授 樋口 理宏 (ヒグチ マサヒロ)

担 当 部 署： ロボティクス・デザイン研究室 (ロボティクス・デザインケンキュウシツ)

E - m a i l : higuchi-m@se.kanazawa-u.ac.jp

U R L : <http://da.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/rdlab/>